

## برآورد طیف پاسخ ویژه ساختگاه اختصاصی برای خاک نوع III در جزیره کیش

شیمای طاهری<sup>۱\*</sup> و مجید معهود<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۳، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۸)

### چکیده

با توجه به اهمیت سازه‌هایی همچون نیروگاه‌ها، سدها، پل‌ها و تاسیسات صنعتی، مطالعه و بررسی این سازه‌ها از دیدگاه زلزله و خطرات و خسارات احتمالی ناشی از آن و نیز شرایط محلی که تاثیر مستقیمی بر افزایش مخاطرات لرزه‌ای می‌گذارد، بسیار ضروری است. با توسعه روزافزون زیرساخت‌های حیاتی و همچنین احداث ساختمان‌های بلندمرتبه در جزیره کیش، که در ناحیه فعال چین‌خورده زاگرس قرار دارد، ارزیابی دقیق خطر زلزله اهمیت زیادی پیدا می‌کند. در این مقاله، لرزه‌خیزی شعاع ۱۰۰ کیلومتری جزیره کیش مورد بررسی قرار گرفته و طیف ویژه ساختگاه برای جزیره کیش برآورد شده و با طیف آیین نامه ۲۸۰۰ مقایسه شده است. براساس این آیین‌نامه جزیره کیش جزء مناطق با خطر نسبی بالا می‌باشد. بزرگترین زمین‌لرزه رخ داده زلزله ۲۰۲۲/۳/۱۶ با بزرگی ۶/۱ در کوخرد در فاصله ۳۴ کیلومتری جنوب شرقی بستک و ۷۰ کیلومتری شمال شرقی جزیره کیش می‌باشد. برای برآورد طیف ویژه ساختگاه از نگاشت‌های ثبت شده دو زلزله بندر چارک که در جزیره کیش هم ثبت شده‌اند، استفاده شده است. زلزله‌های ۲۵ خرداد ۱۴۰۱ با بزرگای ۵/۵ و ۴ تیر ۱۴۰۱ با بزرگای ۵/۷ بندر چارک به ترتیب در فواصل ۴۹ کیلومتری و ۳۱ کیلومتری جزیره کیش رخ داده‌اند که از مهم‌ترین زلزله‌های رخ داده منطقه مورد مطالعه می‌باشند. برای تخمین بهتر از زلزله‌های محتمل آینده، نگاشت‌های زلزله بم با توجه به شرایط ساختگاهی نزدیک با سایت و نیز اطلاعات جهانی NGA-WEST2 متناسب با شرایط خاک مورد نظر استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که طیف پاسخ ویژه در پریودهای تا ۰/۵ ثانیه از مقادیر استاندارد بیش‌تر بوده و در تمام پریودهای بالای درصد حداقل طیف استاندارد باقی می‌ماند. این طیف با در نظر گرفتن شرایط تکنیکی منطقه و تاثیرات ساختگاهی، به‌عنوان ابزار مناسب برای طراحی سازه‌های بلند و حیاتی توصیه می‌شود. از طیف فوق برای تحلیل یک ساختمان در حال احداث در جزیره کیش استفاده شده است.

**کلمه‌های کلیدی:** نوع خاک، طیف ویژه ساختگاه، اثر ساختگاه، خطر زلزله، جزیره کیش

## ۱ مقدمه

اهمیت نوع خاک و طیف پاسخ در مهندسی زلزله برای پیش‌بینی دقیق عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها بسیار زیاد است. شرایط خاک به‌طور قابل توجهی بر پاسخ دینامیکی ساختمان‌ها تأثیر داشته و بر پارامترهایی مانند شتاب طیفی و جابجایی تأثیر می‌گذارد. درک این اندرکنش‌ها برای طراحی لرزه‌ای مؤثر و کاهش ریسک ضروری است. اندرکنش خاک-سازه (soil-structure interaction)، نقش حیاتی در پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها، به‌ویژه در خاک‌های نرم که در آن‌ها اندرکنش می‌تواند اثرات لرزه‌ای را تقویت کند، ایفا می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد که شتاب طیفی و طیف جابجایی در شرایط خاک نرم مقادیر بالاتری دارند و نیاز به بررسی دقیق در طراحی دارد (اوکی و باندره، ۲۰۲۰). تحلیل‌های آماری طیف‌های پاسخ نشان می‌دهد که نوع خاک بر پاسخ‌های الاستیک و غیرالاستیک سازه‌ها تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال، خاک‌های با سختی متوسط، ویژگی‌های طیفی متمایزی را نشان می‌دهند که با آیین‌نامه‌های طراحی مطابقت دارد ولی برای خاک‌های سست تر این تطابق در مناطق مختلف مشاهده نمی‌گردد (لیو و همکاران، ۲۰۱۱). توسعه طیف‌های طراحی غیرالاستیک که شرایط خاک را در نظر می‌گیرند، دقت ارزیابی‌های لرزه‌ای را افزایش می‌دهند، به‌ویژه برای سازه‌هایی که روی خاک‌های با سختی متوسط و کم قرار دارند. گنجاندن نوع خاک در طیف‌های طراحی، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار سازه تحت بارهای لرزه‌ای را فراهم می‌کند و منجر به راه‌حل‌های مهندسی ایمن‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر می‌شود (بهنام‌فر و فتح‌اللهی، ۲۰۱۷). تنوع در طیف‌های پاسخ بر اساس شرایط خاک، نیاز به رویکردهای طراحی لرزه‌ای متناسب، به‌ویژه در مناطقی با ویژگی‌های زمین‌شناسی متنوع را برجسته می‌کند (لیو و همکاران، ۲۰۱۱).

ویژگی‌های لایه‌های خاک، از جمله خواص دینامیکی

آنها، به‌طور قابل توجهی بر تقویت امواج لرزه‌ای تأثیر می‌گذارد و منجر به تغییراتی در حرکت سطح در مقایسه با حرکت سنگ بستر می‌شود (سیولکر و همکاران، ۲۰۲۳). جزیره کیش، واقع در استان هرمزگان ایران، در ناحیه‌ای ساحلی و لرزه‌خیز قرار دارد و شاهد توسعه سریع عمرانی و صنعتی است. با توجه به افزایش نیاز به سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، طراحی‌های ساختمانی بایستی اثرات لرزه‌ای به‌صورت ویژه ساختگاهی در نظر گرفته شود. هدف از این مطالعه، برآورد طیف پاسخ ویژه ساختگاه برای جزیره کیش با استفاده از داده‌های شتاب‌نگاری واقعی و مقایسه آن با طیف آیین‌نامه ۲۸۰۰ می‌باشد. در پی رخداد دو زلزله با بزرگی‌های ۵/۵ در بندر چارک، ۴۹ کیلومتری شرق جزیره کیش در بامداد ۱۴۰۱/۳/۲۵ و زلزله دیگر با بزرگی ۵/۷ بندر چارک، در فاصله ۳۱ کیلومتری کیش در تاریخ ۱۴۰۱/۴/۴ و نیز زمین‌لرزه‌های ۱۹ و ۲۰ دی ماه سال ۱۳۹۲ در جزیره کیش، لرزه‌خیزی در ناحیه جزیره کیش مورد توجه بیشتر متخصصان قرار گرفته است. توسعه عمرانی در منطقه آزاد کیش و ساخت ساختمان‌های مدرن و بلندمرتبه ضرورت توجه دقیق‌تر به مسئله هشدار و پایش زلزله در این جزیره را مشخص می‌کند.

جزیره کیش در جنوب ناحیه چین‌خورده زاگرس که ناحیه‌ای بسیار فعال از نظر لرزه‌خیزی است، واقع شده است. این جزیره در مجاورت گسله جبهه کوهستان زاگرس، که گسله‌ای فشاری با شیبی به سوی شمال و در این ناحیه با روندی شرقی-غربی است، قرار گرفته است. به لحاظ تاریخی نیز زمین‌لرزه ۱۷۰۳ م، قیس (کیش) در اواخر دوره صفویه با بزرگای برآورد شده ۶/۸ موجب ویرانی جزیره‌های کیش و هنگام شده است. زلزله‌های ۹۷۸ م و ۱۰۰۸ م سیراف (بندر طاهری-عسلویه) که برآورد می‌شود بزرگایی بین ۶ تا ۷ داشته‌اند، موجب ویرانی سیراف و از رونق افتادن آن شده و بسیاری از تجار

بزرگای بیشتر از ۶- که با ایجاد گسیختگی در کف دریا همراه می‌شود، احتمال وقوع سونامی بر اثر جابجایی قائم در کف دریا و در راستای صفحه گسل، وجود دارد. زمین‌لرزه‌های جزیره کیش به صورت گروهی و فوج‌گونه رخ داده‌اند. دلیل آن در پهنه زاگرس جنوبی وجود لایه‌های نامقاوم سری نمک هرمز در پوسته است که در سطح زمین به صورت گنبد‌های نمکی -دیپیرها- خودنمایی می‌کنند. در چنین نواحی و به دلیل وجود ویژگی پلاستیکی سری‌های نمکی، عملاً وقوع زمین‌لرزه‌های شدید، به دلیل تجمع انرژی و تمرکز استرس و آزاد شدن انرژی با زمین‌لرزه‌هایی به صورت فوج‌گونه و گروهی از رخدادهایی با بزرگای کم تا متوسط در بیشتر مواقع در زاگرس معمول است. وقوع زمین‌لرزه‌های شدید و مخرب، در بازه‌های زمانی طولانی قابل انتظار است. می‌توان انتظار رخدادی مانند زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۶/۸ مانند زمین‌لرزه ۱۷۰۳ م در جزیره کیش داشت (آمبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲).

شکل (۱) لرزه خیزی دستگاهی به شعاع ۱۰۰ کیلومتری از جزیره کیش از سال ۲۰۰۶ تا سال ۲۰۲۴ را نمایش می‌دهد. عمده لرزه خیزی مربوط به شمال غربی جزیره کیش و شمال شرق جزیره کیش در بندر چارک می‌باشد. همچنین در این شکل لرزه خیزی در شعاع ۱۰۰ کیلومتری جزیره کیش برای لرزه‌های با بزرگی بیشتر از ۴ مشاهده می‌شود که بزرگای اکثر زمین‌لرزه‌ها کمتر از ۵ می‌باشد. بزرگترین زمین‌لرزه رخ داده زلزله ۲۰۲۲/۳/۱۶ با بزرگی ۶/۱ در کوخرد در فاصله ۳۴ کیلومتری جنوب شرقی بستک و ۷۰ کیلومتری شمال شرقی جزیره کیش می‌باشد. جدول (۱) لیست زمین‌لرزه‌های با بزرگی بیش از ۵ در شعاع ۱۵۰ کیلومتری منطقه مورد مطالعه را بیان می‌نماید. تاریخ، زمان محلی، مختصات جغرافیایی محل وقوع زلزله، عمق، بزرگی، منطقه وقوع زلزله و فاصله تا جزیره کیش در این جدول

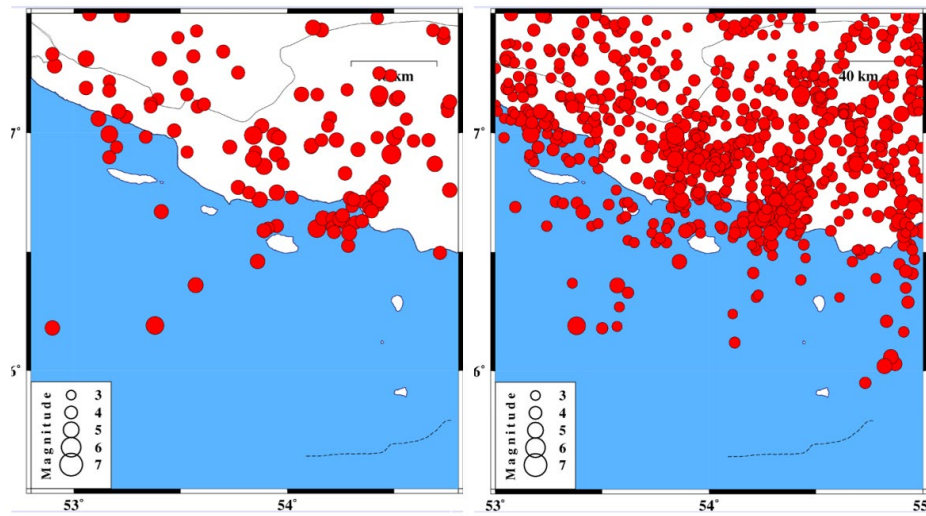
به کیش مهاجرت کرده‌اند و به این ترتیب کیش رونق یافته است. ضمناً در مورد خرابی در بندر تاریخی حریره در زمین‌لرزه‌های تاریخی کیش (به‌ویژه در زمین‌لرزه ۱۷۰۳ م) گمانه‌هایی وجود دارد (آمبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲).

با توجه به گسترش جزیره کیش از لحاظ اقتصادی و توجه به احداث سازه‌های بلند مرتبه در این جزیره، تهیه طیف ویژه ساختگاه منطبق با شرایط ساختگاهی جزیره (خاک نوع III) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله طیف نهایی با در نظر گرفتن داده‌های زلزله‌های منطقه‌ای و نیز داده‌های NGA-WEST2 (به علت کمبود داده‌های ثبت شده موجود با شرایط خاک مورد نظر) برآورد شده است.

## ۲ تاریخچه لرزه خیزی منطقه

جزیره کیش در مجاورت گسل‌های فعال زاگرس جنوبی و در نزدیکی نواحی دارای توده‌های نمکی هرمز قرار دارد. این منطقه سابقه تاریخی لرزه‌های شدید، از جمله زلزله تاریخی ۱۷۰۳ که خسارات گسترده‌ای در کیش ایجاد کرده است، دارد. در دهه‌های اخیر، زلزله‌های مهمی همچون زلزله‌های بندر چارک با بزرگی‌های ۵/۵ و ۵/۷ ثبت شده‌اند که اهمیت ارزیابی دقیق خطر لرزه‌ای در این منطقه را دوچندان می‌کند (معهود و همکاران، ۲۰۰۹).

زلزله‌های ۲۵ خرداد ۱۴۰۱ با بزرگای ۵/۵ و ۴ تیر ۱۴۰۱ با بزرگای ۵/۷ بندر چارک (به ترتیب در فواصل ۴۹ کیلومتری و ۳۱ کیلومتری جزیره کیش) و زلزله‌های ۱۹ و ۲۰ دی ماه ۱۳۹۲ که با بزرگای ۴/۵ تا ۵/۱ رخ داده، از آنجا که نمی‌توانستند موجب گسیختگی مربوط به گسل زمین‌لرزه‌ای در کف دریا -خلیج فارس- بشوند؛ بنابراین وقوع سونامی هم با چنین زمین‌لرزه‌هایی منتفی است؛ ولی با رخداد زمین‌لرزه‌ای شدید -زلزله‌های با



شکل ۱. لرزه خیزی دستگاهی (راست) و لرزه خیزی دستگاهی زلزله های با بزرگی بیش از ۴ به شعاع ۱۰۰ کیلومتری از جزیره کیش (چپ).

جدول ۱. لیست زمین لرزه های با بزرگی بیش از ۵ در منطقه مورد مطالعه.

No.	Date	Time(local)	Lat.	Lon.	Depth	Mag.	Region	Distance
1	2022-03-16	2:45:44	26.91	54.487	15	ML6.1	Hormozgan Province, 34 km South-East of Bastak	70
2	2014-07-30	6:02:07	26.19	53.38	15	ML5.7	Persian Gulf	77
3	2022-06-25	8:07:11	26.598	54.28	12	ML5.7	Persian Gulf, 71 km -West of Bandar-e lengeh	31
4	2010-07-20	0:08:11	26.99	53.84	35	ML5.6	Hormozgan Province, 57 km South-West of Bastak	57
5	2022-06-21	6:43:57	26.994	53.166	12	ML5.4	Persian Gulf, 38 km South of Lamerd	108
6	2022-06-15	1:39:34	26.722	54.433	16	ML5.3	Hormozgan Province, 53 km South of Bastak	54
7	2012-09-06	10:36:04	26.86	53.89	38	ML5.2	Hormozgan Province, 61 km South-West of Bastak	42
8	2010-07-20	6:27:09	26.89	53.84	9	ML5.1	Hormozgan Province, 62 km South-West of Bastak	47
9	2023-04-01	0:20:09	27.311	53.057	13	ML5.1	Fars Province, 11 km -West of Lamerd	138
10	2007-11-22	20:27:38	26.87	54.69	14	ML5	41 km North-West of Bandar-e lengeh, Hormozgan	87
11	2013-04-19	7:14:51	26.99	53.94	34	ML5	Hormozgan Province, 48 km South-West of Bastak	55
12	2014-01-09	2:11:05	26.75	53.95	15	ML5	Hormozgan Province, 64 km South-West of Bastak	28

۲۰ کیلومتری، چاه مسلم ( $PGA=77 \text{ cm/s}^2$ ) در فاصله ۳۶ کیلومتری، کیش ( $PGA=57 \text{ cm/s}^2$ ) در فاصله ۵۵ کیلومتری و رستاق ( $PGA=17 \text{ cm/s}^2$ ) در فاصله ۵۵ کیلومتری رومرکز زلزله برای طیف ویژه ساختگاه استفاده شده است.

در روز ۲۵ خرداد ۱۴۰۱ در ساعت ۱۰:۳۶ زمین لرزه ای با بزرگی ۵/۵ در بندر چارک رخ داد و در ۱۴ ایستگاه شبکه شتابنگاری استانهای فارس و هرمزگان ثبت شد. در شکل (۲) محل رویداد زلزله و ایستگاههای شتابنگاری ثبت کننده این زلزله نمایش داده شده است. از رکوردهای ۴ ایستگاه شتابنگاری بندر چارک ( $PGA=328 \text{ cm/s}^2$ ) در

ذکر شده است. نزدیکترین زلزله مهم زلزله ۱۴۰۱/۴/۴ بندر چارک با بزرگی ۵/۷ در فاصله ۳۱ کیلومتری کیش می باشد.

### ۳ داده ها و روش ها

در روز ۴ تیر ۱۴۰۱ در ساعت ۰۸:۰۷ زمین لرزه ای با بزرگی ۵/۷ در بندر چارک رخ داد و در ۱۳ ایستگاه شبکه شتابنگاری استانهای فارس و هرمزگان ثبت شد. در شکل (۲) محل رویداد زلزله و ایستگاههای شتابنگاری ثبت کننده این زلزله بر اساس گزارش مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، نمایش داده شده است. از رکوردهای ۴ ایستگاه شتابنگاری بندر چارک ( $PGA=249 \text{ cm/s}^2$ ) در فاصله



خطاها اصلاح می‌شوند)، انطباق طیفی (Spectral Matching) (طیف پاسخ شتابنگاشت اصلاح شده با طیف طراحی یا طیف هدف همسان می‌شود که این کار باعث می‌شود داده‌ها برای تحلیل سازه‌ها در شرایط خاص ساختگاه قابل استفاده باشند).

جدول ۲. مشخصات شتابنگاشتهای استفاده شده در برآورد طیف (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی).

شماره رکورد	تاریخ	بیشینه شتاب (cm/s/s)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	فاصله رومرکزی	MW	نام ایستگاه	زلزله
3168/02	12/26/2003	969	29.04	58.33	6	6.5	بم	بم
9565/07	6/25/2022	249	26.55	54.26	20	5.7	بندرچارک ۱	بندر چارک
9564/03	6/25/2022	77	26.55	54.26	36	5.7	چاه مسلم	
9563	6/25/2022	57	26.55	54.26	31	5.7	کیش	
9572/02	6/25/2022	17	26.55	54.26	55	5.7	رستاق ۱	
9506/10	6/15/2022	328	26.86	54.32	15	5.5	بندرچارک ۱	بندر چارک
9509/02	6/15/2022	80	26.86	54.32	27	5.5	چاه مسلم	
9510	6/15/2022	33	26.86	54.32	49	5.5	کیش	
9546/04	6/15/2022	11	26.86	54.32	46	5.5	رستاق ۱	
9410	3/16/2022	120	26.88	54.75	35	5.9	کوخرد	کوخرد
9387	3/16/2022	78	26.88	54.75	37	5.9	ده تل ۱	
9384	3/16/2022	45	26.88	54.75	51	5.9	بستک ۱	
9407	3/16/2022	13	26.88	54.75	92	5.9	رویدر	
9385	3/16/2022	11	26.88	54.75	137	5.9	بیرم ۱	

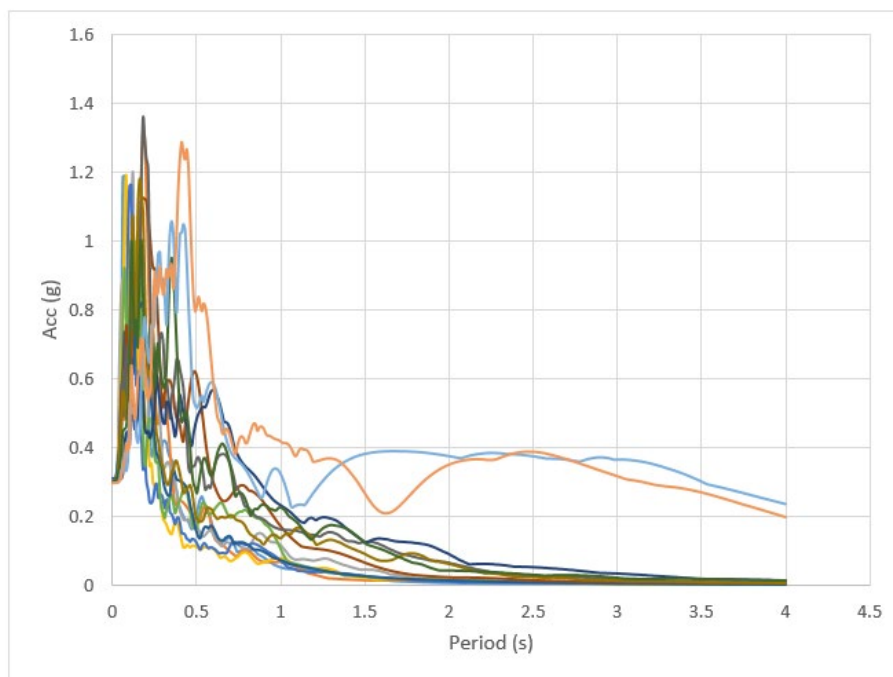
جدول ۳. مشخصات شتابنگاشتهای استفاده شده از اطلاعات جهانی NGA-WEST2 (سایت PEER).

No.	Earthquake Name	Year	Station Name	M	Mechanism	Rjb (km)	Vs30 (m/sec)
1	"Northwest Calif"	1951	"Ferndale City Hall"	5.8	strike slip	53.73	219.31
2	"Parkfield"	1966	"Cholame - Shandon Array"	6.19	strike slip	12.9	256.82
3	"Northern Calif-05"	1967	"Ferndale City Hall"	5.6	strike slip	27.36	219.31
4	"Borrego Mtn"	1968	"El Centro Array #9"	6.63	strike slip	45.12	213.44
5	"Lytle Creek"	1970	"Colton - So Cal Edison"	5.33	Reverse Oblique	29.18	301.95
6	"San Fernando"	1971	"Whittier Narrows Dam"	6.61	Reverse	39.45	298.68
7	"Friuli_ Italy-02"	1976	"Codroipo"	5.91	Reverse	41.37	249.28
8	"Coyote Lake"	1979	"Halls Valley"	5.74	strike slip	33.69	281.61
9	"Livermore-01"	1980	"Antioch - 510 G St"	5.8	strike slip	13.38	304.68
10	"Victoria_ Mexico"	1980	"SAHOP Casa Flores"	6.33	strike slip	39.1	259.59
11	"Irpina_ Italy-02"	1980	"Bovino"	6.2	Normal	43.5	356.39
12	"Taiwan SMART1(5)"	1981	"SMART1 C00"	5.9	Reverse	25.5	309.41

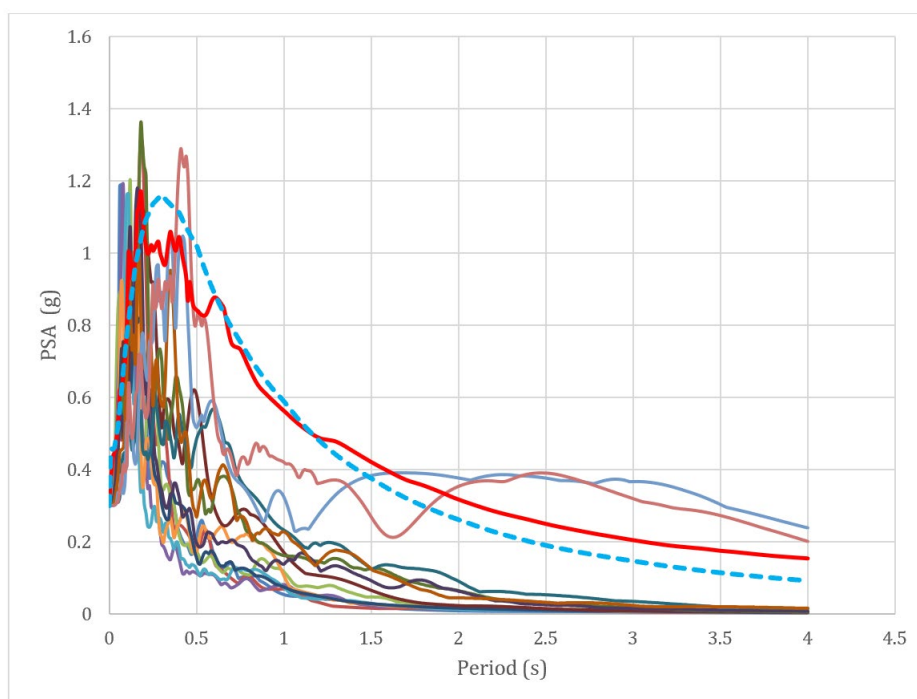
#### ۴ نتایج و بحث

نوع خاک به طور قابل توجهی بر شتاب طیفی که سازه‌ها در طول زلزله تجربه می‌کنند، تأثیر می‌گذارد، که عمدتاً از طریق تأثیر آن بر اندرکنش خاک-سازه و خواص دینامیکی خاک است. انواع مختلف خاک پاسخ‌های متفاوتی به امواج لرزه‌ای نشان می‌دهند که می‌تواند شتاب و جابجایی تجربه شده توسط سازه‌ها را تغییر دهد. منحنی طیف طرح استاندارد آیین‌نامه به کمک روش‌های آماری و به کمک تعداد زیادی شتاب نگاشت به دست می‌آید. اما در رابطه با سازه‌های پر اهمیت نیاز به محاسبات دقیق‌تری جهت محاسبه طیف طرح می‌باشد تا دقت نتایج بهبود یابد. در این مواقع، آیین‌نامه استفاده از طیف طرح ویژه ساختگاه را به جای طیف طرح استاندارد پیشنهاد می‌کند. بنا به توضیحات آیین‌نامه در بند ۲-۵-۲، این طیف با استفاده از مشخصات زلزله‌های منطقه ساختگاه و با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، تکتونیکی، لرزه‌شناسی، میزان خطرپذیری و مشخصات خاک در لایه‌های مختلف

ساختگاه و با به کارگیری نسبت میرایی ۵ درصد تعیین می‌گردد. لازم به ذکر است که مقدار این طیف نباید از ۸۰ درصد طیف طرح استاندارد کمتر در نظر گرفته شود. بدین منظور شتاب‌نگاشت‌های حاصل از زلزله بندر چارک به سبب اهمیت زلزله‌های منطقه به همراه نگاشت‌های زلزله بم ثبت شده در ایستگاه بم، با توجه به شرایط نزدیک ساختگاه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. از اطلاعات جهانی NGA-WEST2 و طیف میانگین به علت کمبود داده‌های ثبت شده موجود با شرایط خاک مورد نظر، نیز استفاده شده است که مشخصات زلزله‌ها و شتاب‌نگاشت‌ها در جدول (۳) بیان شده است. در شکل (۳) طیف‌های پاسخ شتاب همپایه شده شتاب‌نگاشت‌های مورد بررسی نمایش داده شده‌اند. طیف پاسخ مولفه‌های افقی زلزله بم با رنگ‌های آبی و نارنجی بالاتر از بقیه طیف‌ها در شکل مشخص می‌باشد. با توجه به قرار گرفتن منطقه مورد مطالعه در ناحیه با خطر زیاد و بیشینه شتاب  $0.3g$  طیف پاسخ‌ها به این بیشینه شتاب همپایه شده‌اند در شکل (۴) علاوه بر طیف‌های پاسخ شتاب همپایه شده



شکل ۳. طیف‌های پاسخ همپایه شده شتاب‌نگاشت‌های مورد بررسی (طیف‌های آبی و نارنجی مولفه‌های افقی زلزله بم).



شکل ۴. طیف‌های پاسخ همپایه‌شده شتاب‌نگاشت‌های مورد بررسی به همراه طیف ساختگاه میانگین و طیف میانگین براساس NGA-WEST2

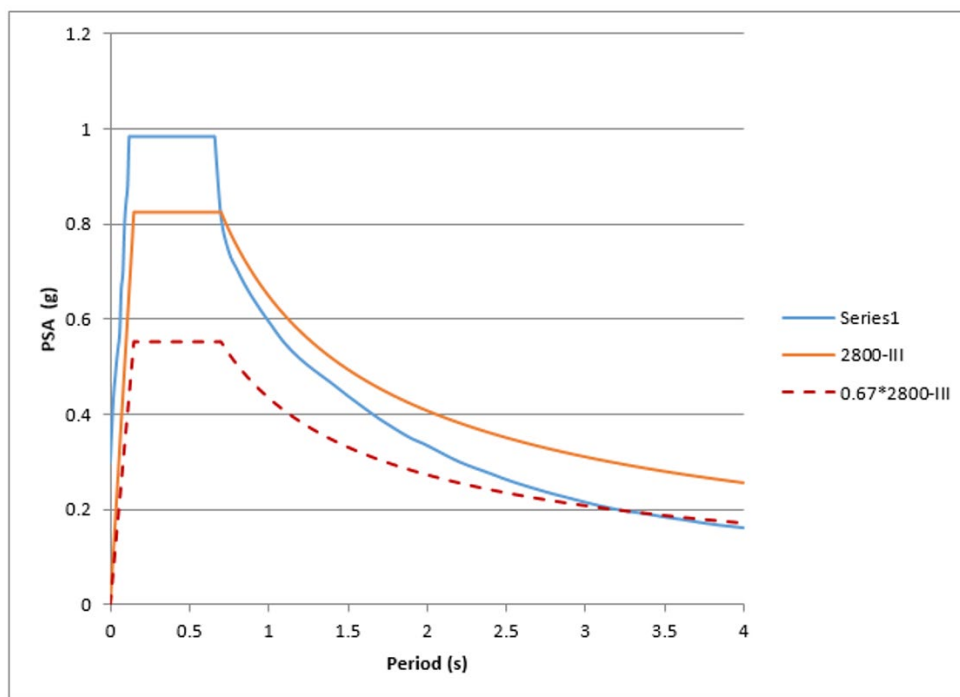
طیف آیین‌نامه قرار می‌گیرد ولی بالا تر از ۶۷٪ طیف آیین‌نامه قرار دارد. از پررود تقریباً ۲ ثانیه به بعد طیف میانگین پیشنهادی با سرعت بیشتری افت کرده ولی پایین تر از حد مقرر در آیین‌نامه قرار نمی‌گیرد. با توجه به تاریخچه لرزه‌خیزی جزیره کیش و ثبت زلزله‌های اخیر نزدیک منطقه مورد مطالعه، طیف پیشنهادی که با وزن بیشتری از زلزله‌های محلی برآورد شده است، مناسب می‌باشد.

افزایش مقادیر طیف پاسخ ویژه در پررودهای کوتاه به وضوح نشان‌دهنده اثرات تقویت ساختگاهی ناشی از شرایط خاک و پروفیل زمین‌شناسی خاص جزیره کیش است. این نتایج با مدل‌های استاندارد آیین‌نامه ۲۸۰۰ متفاوت بوده و نشان می‌دهد که در مناطق با خطر بالا و شرایط ویژه ساختگاهی، نیاز به استفاده از طیف‌های ویژه، به ویژه در سازه‌های صلب و همچنین در ساختمان‌های بلند با تاثیرگذاری بالا از مودهای بالاتر، وجود دارد. از سوی دیگر، کاهش نسبت به استاندارد در پررودهای بلندتر نیز می‌تواند نشانگر رفتار دینامیکی سازه‌های بلندمرتبه و

شتاب‌نگاشت‌های مورد بررسی طیف میانگین و پیشنهادی ساختگاه به رنگ قرمز نمایش داده شده است. برای محاسبه طیف میانگین، از روش میانگین هندسی استفاده شده است. براساس روش میانگین هندسی همه مقادیر در هم ضرب می‌شوند و ریشه  $n$  ام حاصلضرب محاسبه می‌شود ( $n$  تعداد نمونه‌ها در شتاب‌نگاشت می‌باشد). طیف نهایی با در نظر گرفتن میانگین طیف برگرفته از داده‌های NGA-WEST2 (به علت کمبود داده‌های ثبت شده موجود با شرایط خاک مورد نظر) و نیز قضاوت مهندسی برآورد شده است. در این شکل، نمودار میانگین طیف NGA-West2 به صورت آبی کمرنگ خط چین نمایش داده شده است (مک کالن و همکاران، ۲۰۲۵). در شکل (۵) مقایسه طیف ساختگاه پیشنهادی با رنگ آبی با طیف آیین‌نامه ۲۸۰۰ (رنگ نارنجی) و ۶۷٪ طیف آیین‌نامه (رنگ قرمز خط چین) به نمایش درآمده است. همانطور که مشاهده می‌گردد طیف پیشنهادی تا پررود ۰/۸ ثانیه دارای مقادیر بیشتری نسبت به طیف آیین‌نامه بوده و از پررود ۰/۸ ثانیه کمی پایین تر از

دقت مدل‌های پیش‌بینی نمایان می‌سازد. تحلیل‌های آماری و مقایسه‌های عددی نشان می‌دهند که استفاده از داده‌های واقعی و در نظر گرفتن اثرات ساختگاهی می‌تواند به کاهش ریسک‌های ناشی از وقوع زلزله‌های ناگهانی و افزایش ایمنی سازه‌ها کمک کند. بنابراین، این مطالعه نه تنها اهمیت استفاده از داده‌های محلی را برجسته می‌کند، بلکه راهکارهای نوینی برای مدلسازی خطر لرزه‌ای در مناطق مشابه ارائه می‌دهد.

انعطاف‌پذیری خاک در جذب انرژی لرزه‌ای باشد. تجزیه و تحلیل دقیق داده‌های شتاب‌نگاری، همراه با بررسی ساختار زمین‌شناسی و تکنیکی منطقه، پیشنهاد می‌کند که رویکردهای طراحی مرسوم ممکن است در این مناطق به اندازه کافی محافظه‌کارانه نباشند و بهره‌گیری از طیف‌های ویژه، می‌تواند دقت طراحی‌های مقاوم در برابر زلزله را افزایش دهد. علاوه بر این، نتایج به‌دست آمده اهمیت نگاشت دقیق زلزله‌های محلی و منطقه‌ای را برای بهبود



شکل ۵. مقایسه طیف ساختمان پیشنهادی (آبی) با طیف آیین نامه ۲۸۰۰ (نارنجی) و ۶۷٪ طیف آیین نامه (قرمز خط چین).

از ۴۷۵ سال) در آن لحاظ نمی‌گردد در نتیجه هیچ معیار کمی برای تأمین حاشیه ایمنی مطلوب در عملکرد سازه‌ها در آن ارائه نگردیده است. از طرفی دیگر طراحی ساختمان‌ها با استفاده از آیین‌نامه‌هایی که بر مبنای خطر لرزه‌ای یکسان تهیه شده‌اند (به طور مثال احتمال فراگذشت ۱۰٪ در ۵۰ سال) لزوماً به میزان ریسک فروریزش یکنواخت منجر نمی‌شود.

تحلیل طیف پاسخ می‌تواند به‌طور مؤثر برای در

رویکردهای مختلفی برای توسعه طیف‌های طراحی در دوره‌های زمانی مختلف توسط آیین‌نامه‌ها اتخاذ شده است. در این میان طیف‌های طراحی در آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله ایران (آیین‌نامه ۲۸۰۰) به دلیل اینکه بر اساس تحلیل آماری طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌ها و مقیاس‌سازی با استفاده از مقدار بیشینه شتاب زمین به دست آمده از تحلیل خطر احتمالاتی تهیه می‌گردند و در این طیف‌ها اثر زلزله‌های بسیار نادر (با دوره بازگشت طولانی‌تر

رانس‌های بین طبقه‌ای بزرگتری می‌شوند که نشان دهنده پاسخ انعطاف‌پذیرتر است.

همچنین لوی و همکاران (۲۰۱۳)، بیان می‌کنند که خاک‌های سخت معمولاً در مقایسه با خاک‌های نرم، به ویژه در پروده‌های پایین‌تر، پاسخ‌های شتاب طیفی بالاتری تولید می‌کنند. بهنام فر و فتح‌الهی (۲۰۱۷) به بررسی انواع خاک و تاثیر آن بر شتاب طیفی و حداکثر پاسخ سازه‌ها پرداختند و مشاهده کردند که نوع خاک به‌طور قابل توجهی بر شتاب طیفی تأثیر می‌گذارد، زیرا شرایط مختلف خاک بر اندرکنش خاک-سازه تأثیر می‌گذارد. مطالعات آنها نشان می‌دهد که انواع مختلف خاک در نظر گرفته شده بر حداکثر پاسخ سازه‌ها، به ویژه سازه‌هایی با حداکثر ۱۰ طبقه در هنگام زلزله، تأثیر می‌گذارند و افزایش شتاب پاسخ برای ساختمان‌های تا ۵ طبقه مشاهده و ثبت می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که وجود لایه‌های نرم رسوبی و گسل‌های فعال در اطراف جزیره کیش سبب تشدید پاسخ دینامیکی در پروده‌های زمانی خاص می‌شود. این مسئله اهمیت استفاده از طیف‌های ویژه ساختگاه در طراحی سازه‌ها را دوچندان می‌کند، زیرا طیف‌های آیین‌نامه‌ای در چنین مناطق لرزه‌خیزی نمی‌توانند به تنهایی ایمنی کامل را تضمین کنند.

##### ۵ اثر خاک نوع III بر روی رفتار سازه‌های بلند

در زمینه طیف پاسخ ویژه ساختگاه برای جزیره کیش، که با نوع خاک سه (خاک‌های متوسط تا نرم با سرعت موج برشی معمولاً بین ۱۷۵ متر بر ثانیه و ۳۷۵ متر بر ثانیه طبق استاندارد ۲۸۰۰ ایران) مشخص می‌شود، تأثیر تعامل خاک-سازه (SSI) بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بلند حیاتی است. نوع خاک سه، که در مناطق ساحلی مانند جزیره کیش به دلیل رسوبات آهکی و شنی با لایه‌های رسی زیرین شایع است، حرکات زمین را تقویت می‌کند و منجر به افزایش تقاضاهای سازه‌ای در مقایسه با خاک‌های سفت‌تر می‌شود.

نظرگرفتن شرایط مختلف خاک در طراحی لرزه‌ای از طریق چندین روش که دقت ارزیابی‌های لرزه‌ای را افزایش می‌دهند، تطبیق داده شود. این تطبیق‌ها برای اطمینان از اینکه سازه‌ها می‌توانند در برابر نیروهای لرزه‌ای متناسب با شرایط خاص سایت مقاومت کنند، بسیار مهم هستند. استفاده از داده‌های ژئوتکنیکی، گنجاندن داده‌های ژئوتکنیکی محلی، امکان استخراج طیف‌های پاسخ را فراهم می‌کند که منعکس‌کننده ویژگی‌های منحصر به فرد انواع مختلف خاک است (جانوس و همکاران، ۲۰۲۴). به عنوان مثال، مطالعات در ایران تفاوت‌های قابل توجهی را در حوزه‌های فرکانس و بزرگنمایی‌ها هنگام مقایسه خاک‌های سخت و نرم نشان داده‌اند (نورزاده و همکاران، ۲۰۱۳، جلیلی و همکاران، ۲۰۲۲). لایاس و همکاران، (۲۰۲۴). نقشه‌های خطر لرزه‌ای احتمالی به‌روزرسانی شده در بنگازی را تهیه کرده که تغییرات حداکثر شتاب زمین (PGA) را در انواع خاک در نظر می‌گیرند و بزرگنمایی‌های قابل توجهی از PGA را در مناطق خاک نرم نشان می‌دهند. این مطالعه طیف‌های پاسخ طراحی به‌روز شده‌ای را برای شهر بنگازی ارائه می‌دهد که اثرات بزرگنمایی خاک را نیز در بر می‌گیرد. این مطالعه، تقویت‌های قابل توجه حداکثر شتاب زمین در مناطق خاک نرم را برجسته می‌کند و بر لزوم در نظر گرفتن شرایط مختلف خاک در طراحی لرزه‌ای برای ارزیابی دقیق خطر تأکید دارد (لایاس و همکاران، ۲۰۲۴).

طبق نتایج مولا و آتامان (۲۰۲۴)، نوع خاک و پاسخ سازه بصورت زیر می‌تواند در نظر گرفته شود:

- خاک‌های شنی: سازه‌های روی خاک‌های شنی شتاب‌های اوج بالاتری (تا ۰.۱۷۰ g) اما جابجایی‌های کمتری را تجربه می‌کنند که نشان دهنده پاسخ با انعطاف‌پذیری کمتری به نیروهای لرزه‌ای است.
- خاک‌های رسی: در مقابل، خاک‌های رسی شتاب‌های متوسطی (تا ۰.۱۴۰ g) دارند اما منجر به

سطح زمین است، که با پیش‌بینی‌های آیین‌نامه مرجع مبنی بر کاهش‌های جزئی مغایرت دارد و بر کم‌برآوردی در صورت استفاده از فرضیات پایه استاندارد ۲۸۰۰ تأکید می‌کنند.

افزایش تاب‌آوری لرزه‌ای در توسعه‌های جزیره کیش، به شدت توصیه می‌شود. شکیب و فولادگر (۲۰۰۳) به گنجاندن تعامل خاک-سازه در تحلیل‌ها، به‌ویژه برای ساختمان‌های بیش از ۲۰ طبقه، و استفاده از روش‌های مستقیم با مدل‌سازی المان محدود خاک برای ثبت رفتار غیرخطی خاک تحت حرکات دورمیدان و نزدیک‌میدان تأکید دارند. تحقیقات آینده باید طیف‌های ویژه ساختمانی را با ارزیابی‌های احتمالی تعامل خاک-سازه پالایش کند تا بهتر با الزامات استاندارد ۲۸۰۰ همخوانی یابد.

#### ۶ مطالعه موردی بر روی یک ساختمان بلند

ساختمان مورد مطالعه، یک برج دوقلوی ۲۰ طبقه در جزیره کیش است، که دارای ارتفاع یکسان هستند، اما در پلان و طبقات با یکدیگر اختلاف دارند. دو برج بر روی یک پودیموم مشترک به ارتفاع دو طبقه قرار گرفته‌اند. جهت اصلی دو برج، همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، زاویه ۶۰ درجه نسبت به یکدیگر ایجاد می‌کند. بخش متصل‌شونده دو برج به صورت فولادی و مابقی برج به صورت بتنی است.

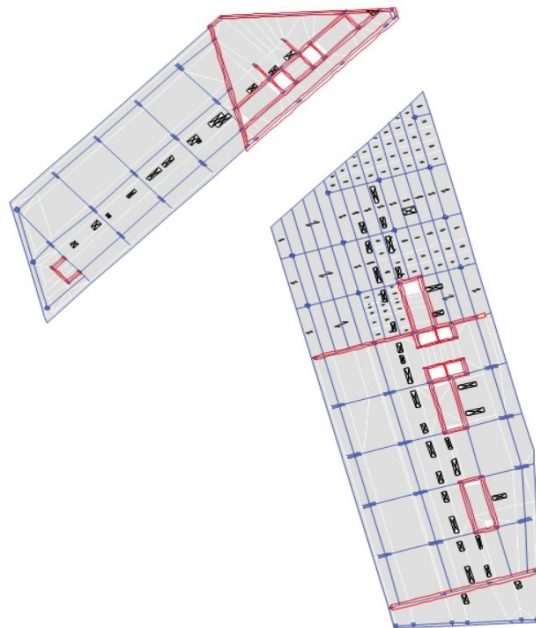
طراحی اولیه برج توسط یک شرکت کانادایی انجام گرفته و سپس انطباق آن با ضوابط و مقررات ملی ایران با استفاده از آیین‌نامه استاندارد ایران و مباحث مقررات ملی ایران انجام گرفته است. سیستم مقاوم در برابر نیروی جانبی این برج، یک سیستم دوگانه متشکل از یک قاب خمشی بتن مسلح ویژه و دیوارهای برشی بتن مسلح ویژه است. سازه موجود ۷۶ متر از سطح فونداسیون ارتفاع دارد. ارتفاع معمول طبقات بالای زمین ۳/۶ متر و ارتفاع معمول طبقه زیر زمین ۴ متر است.

طیف ویژه ساختمانی برای جزیره کیش، که با طیف پاسخ طراحی استاندارد ۲۸۰۰ برای مناطق با لرزه‌خیزی بالا همخوانی دارد، عوامل تقویت خاک را در بر می‌گیرد که بر پیوندهای طولانی‌تر مرتبط با سازه‌های بلندمرتبه (مانند پیوندهای بیش از ۱۰۵ ثانیه) تأکید می‌کند. دیزاج و همکاران (۲۰۱۸) با نشان‌دادن این همخوانی، نیاز به در نظر گرفتن اثرات SSI را برجسته می‌سازند، زیرا نادیده گرفتن آنها می‌تواند پاسخ‌ها را در ساختمان‌های بلند کم برآورد کند.

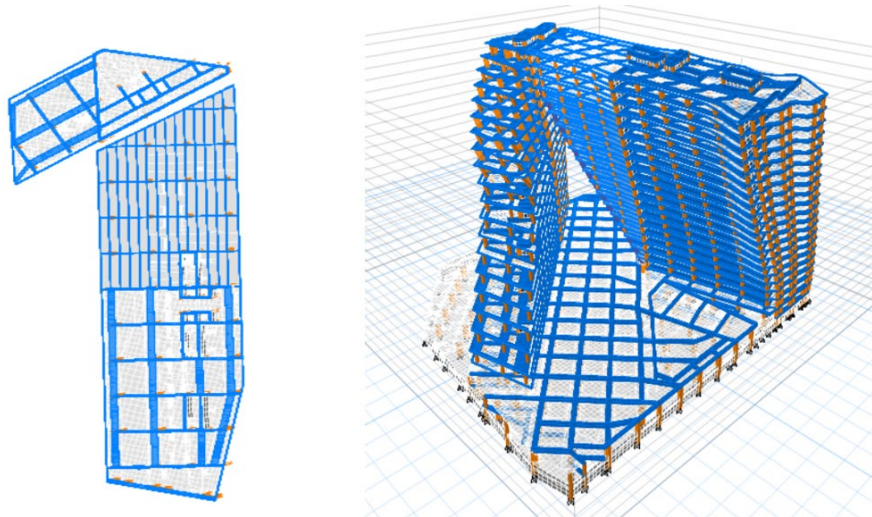
تعامل خاک-سازه در محیط‌های نوع خاک سه، ویژگی‌های دینامیکی ساختمان‌های بلند را با طولانی کردن پیوند طبیعی و افزایش میرایی به دلیل انعطاف‌پذیری خاک و میرایی تشعشعی تغییر می‌دهد. قدرتی امیری و همکاران (۲۰۱۰) نشان داده‌اند، برای قاب‌های مقاوم خمشی بتن مسلح (با بیش از هفت طبقه)، این امر منجر به افزایش جابه‌جایی‌های جانبی، احتمالاً تا ۱۹-۲۵ درصد می‌شود، در حالی که برش پایه ممکن است به دلیل اتلاف انرژی در خاک کاهش یابد. محمدپور و زرین (۲۰۲۲) با انجام مطالعات بر روی قاب‌های خمشی فولادی با پیوندهای بالا (نمایانگر سازه‌های بلند) تحت طیف‌های استاندارد ۲۸۰۰ نشان دادند که ضرایب نوع خاک سه در ناحیه سوم طیف پاسخ (محدوده پیوند بالا) جابه‌جایی‌های جانبی را تشدید می‌کند و نیاز به عوامل پهنه‌بندی لرزه‌ای بازنگری شده برای کاهش خطرات تغییر شکل بیش از حد و فروپاشی احتمالی ضروری است. اکبری و همکاران (۲۰۲۵) به مطالعه بر روی خاک‌های رسی مشابه نوع سه، مشابه کیش، در روش ساخت از بالا به پایین، که برای ساختمان‌های بلند با زیرزمین رایج است و در آن دیوارهای حائل را با سازه ادغام می‌شود، پرداخته‌اند و تاثیرگذرای بر افزایش پاسخ‌ها را گزارش کرده‌اند. تحلیل‌های عددی نشان‌دهنده افزایش نیروهای برشی (تا ۲۱ درصد)، شتاب‌ها (۱۴ درصد) و دررفت‌ها (۲۵ درصد) هنگام قرارگیری پایه لرزه‌ای در

حائل در تمام طبقات ۳۵۰ میلی‌متر است. بتن استفاده شده در پروژه دارای مقاومت ۴۰ مگاپاسکال است. برای طبقات، از یک دال بتنی تخت مسلح به ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر و در بخش فلزی از عرشه فولادی استفاده شد. اولین مودهای سازه در شکل‌های ۷ تا ۹ نشان داده شده‌اند تا به درک رفتار دینامیکی سازه کمک کنند.

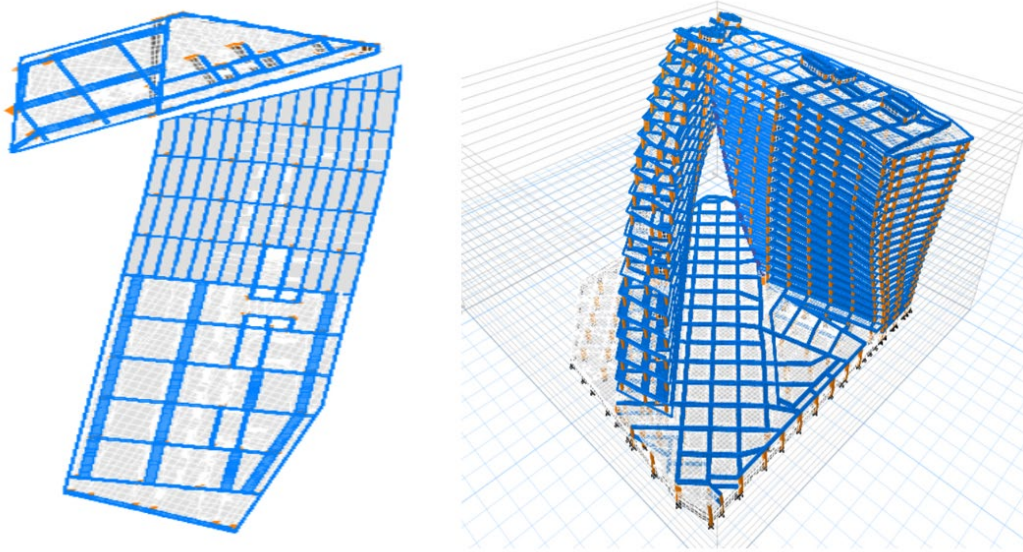
دیوارهای برشی، همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، در طرفین برج و همچنین در امتداد پله‌ها، آسانسورها و ... به شکل گسترده قرار گرفته‌اند. پایین‌ترین طبقات دارای دیوار برشی به ضخامت ۹۰۰ میلی‌متر و ستون‌هایی با حداکثر اندازه ۶۰۰ میلی‌متر در ۲۰۰۰ میلی‌متر هستند. ارتفاع تیرهای اصلی در تمام طبقات فوقانی ۴۰۰ میلی‌متر و در طبقه پودیموم عموماً ۶۰۰ میلی‌متر است. ضخامت دیوار



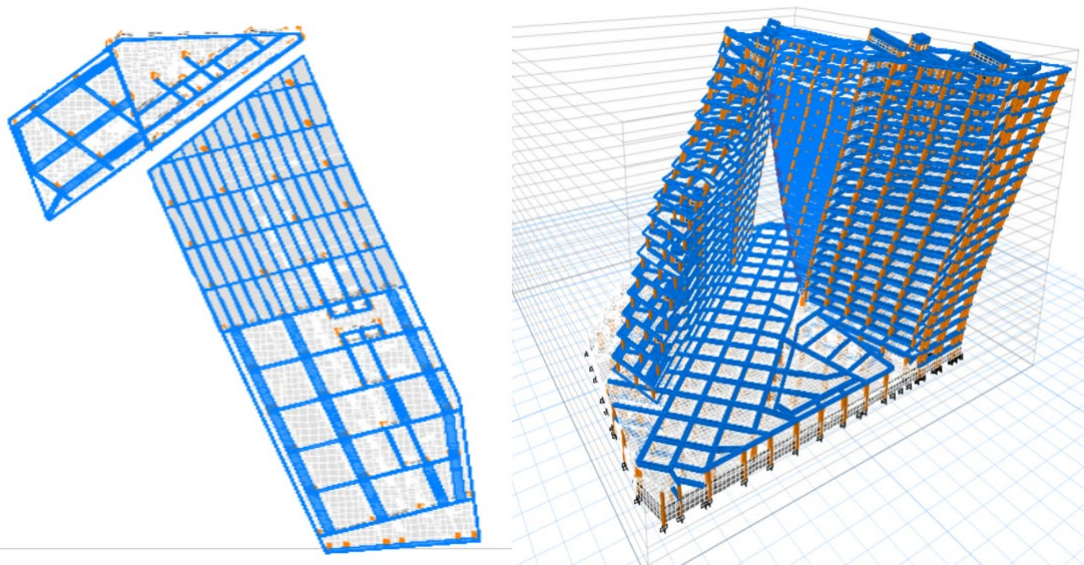
شکل ۶. موقعیت قرارگیری برج‌ها.



شکل ۷. تغییر شکل سازه در مود اول (زمان تناوب ۲/۱ ثانیه).



شکل ۸. تغییر شکل سازه در مود دوم (زمان تناوب ۱/۳ ثانیه).



شکل ۹. تغییر شکل سازه در مود سوم (زمان تناوب ۱/۲ ثانیه).

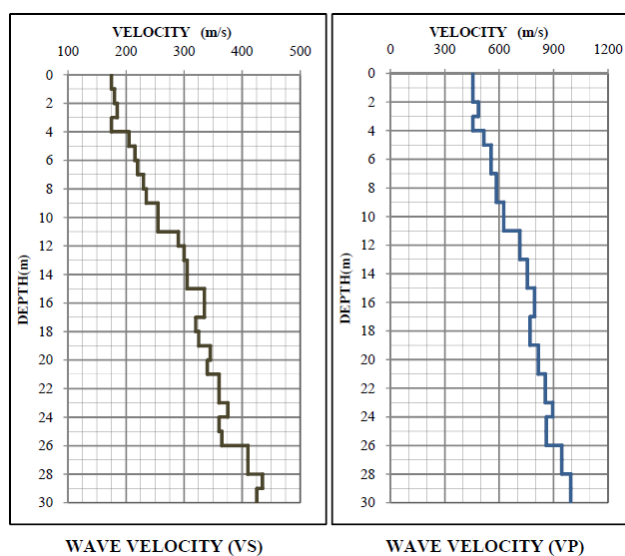
و غلبه رفتار پیچشی در اشکال فوق نمایان است. در این نوع سازه‌ها، اهمیت مودهای بالاتر به مراتب نمایانتر می‌شود (گائو و بای (۲۰۲۳)). این موضوع با توجه به مواردی که در بخش چهارم و تفاوت قابل ملاحظه طیف طرح استاندارد با طیف ویژه ساختمانی وجود دارد، نمایان تر شده

همانطور که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود با توجه به شرایط هندسی خاص دو برج و اتصال آن‌ها در بخش فوقانی و همچنین تعدد و گستردگی بالای دیوارهای برشی زمان تناوب‌های سازه نسبت به سازه‌های متعارف با این تعداد طبقه کمتر است. همچنین پیچیدگی شکل‌های مودی

خطر یکنواخت مورد نظر بوده و بیشترین شباهت را با طیف مذکور داشته باشند. روشهای انتخاب نگاهت جنبش نیرومند زمین بر اساس طیف میانگین شرطی CMS شبیه به روش قبلی است؛ با این تفاوت که در این روش، از شکل طیف هدف به عنوان جایگزین طیف خطر یکنواخت (UHS) برای انتخاب جنبشهای زمین استفاده می‌شود. گروه انتخاب جنبشهای زمین با استفاده از مؤلفه اپسیلون ( $\epsilon$ )، روشی است که انتخاب جنبشهای زمین در آن بر اساس مقدار اپسیلون آنها در دوره تناوب اصلی ساختمان  $\epsilon(T1)$  صورت می‌گیرد؛ به طوری که مؤلفه  $\epsilon(T1)$  تا حد امکان به عدد مورد نظر نزدیک باشد.  $\epsilon(T1)$  شاخصی به صورت انحراف استاندارد لگاریتمی است که بین طیف پاسخ زلزله مورد نظر و طیف مبنای مقایسه (موسوم به طیف میانگین شرطی) محاسبه می‌شود (بیکر و کرنل، ۲۰۰۶). شاخصهای بیشینه شتاب از دیگر مؤلفه‌های موجود برای انتخاب جنبشهای زمین هستند. شاخص (بیشینه شتاب زمین) PGA و  $Sa(T1)$  شاخص شدت شتاب طیفی در دوره تناوب حالت اول سازه هرچند بسیار مورد استفاده قرار گرفته اند، اما اطلاعاتی را در ارتباط با شکل طیف پاسخ در بر ندارند.

است و لزوم در نظر گرفتن طیف ویژه ساختگاه در طراحی این ساختمان، به ویژه طراحی بخش‌های فوقانی را نشان می‌دهد. در شکل (۱۰) نمودارهای آزمایشات خاک و تغییرات سرعت برشی و طولی با عمق (پروفیل موج برشی و طولی با عمق) در منطقه مورد مطالعه نمایش داده شده است که بیانگر خاک نوع III می‌باشد.

محققان مختلف، روشهایی را در زمینه انتخاب شتابنگاشت پیشنهاد نموده اند. یکی از این روشها، انتخاب بر اساس بزرگا، فاصله تا محل مورد نظر، شرایط خاک محل، نحوه گسلش یا سازوکار کانونی منبع و متوسط سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متری VS30 است. در این روش، در ابتدا مشخصات مورد نظر انتخاب شده و سپس رکوردهایی که خصوصیات آنها تا حد امکان نزدیک به مقادیر مشخص شده هستند، انتخاب می‌شوند. در روشی دیگر (Spectral Matching)، انتخاب با استفاده از طیف خطر یکنواخت UHS صورت می‌گیرد. در این روش، طیفهای پاسخ هر جنبش زمین بر اساس دامنه آن به صورتی مقیاس می‌شوند که در محدوده زمان تناوبهای  $0/2 T$  تا  $1/5 T$  (زمان تناوب اصلی سازه است)، نزدیک به طیف



شکل ۱۰. نمودارهای آزمایشات خاک و تغییرات سرعت برشی و طولی با عمق در منطقه مورد مطالعه.

## ۷ نتیجه گیری

می‌شود.

در زمینه تهیه طیف ویژه ساختگاه، در رابطه با سازه‌های پر اهمیت نیاز به محاسبات دقیق‌تری جهت محاسبه طیف طرح می‌باشد تا دقت نتایج بهبود یابد. برای برآورد طیف ویژه ساختگاه از نگاشت‌های ثبت شده دو زلزله بندر چارک که در جزیره کیش هم ثبت شده اند، استفاده شده است. زلزله‌های ۲۵ خرداد ۱۴۰۱ با بزرگای ۵/۵ و ۴ تیر ۱۴۰۱ با بزرگای ۵/۷ بندر چارک به ترتیب در فواصل ۴۹ کیلومتری و ۳۱ کیلومتری جزیره کیش رخ داده‌اند که از مهمترین زلزله‌های رخ داده منطقه مورد مطالعه می‌باشند. برای تخمین بهتر از زلزله‌های محتمل آینده، نگاشت‌های زلزله بم با توجه به شرایط ساختگاهی نزدیک با سایت مورد نظر، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. طیف ویژه ساختگاه بر اساس شتابنگاشت‌های ثبت شده برآورد گردیده و با طیف آیین نامه ۲۸۰۰ مقایسه شده است. طیف پیشنهادی تا پریرود ۰/۵ ثانیه دارای مقادیر بیشتری نسبت به طیف آیین نامه بوده و از پریرود ۰/۵ ثانیه کمی پایینتر از طیف آیین نامه قرار می‌گیرد ولی بالا تر از حداقل مقدار طیف آیین نامه قرار دارد. از پریرود تقریباً ۲ ثانیه به بعد طیف میانگین پیشنهادی با سرعت بیشتری افت کرده ولی پایینتر از حداقل مقدار طیف آیین نامه قرار نمی‌گیرد. با توجه به تاریخچه لرزه‌خیزی جزیره کیش و ثبت زلزله‌های اخیر نزدیک منطقه مورد مطالعه، طیف پیشنهادی که با وزن بیشتری از زلزله‌های محلی برآورد شده است، مناسب می‌باشد.

## قدردانی

نویسندگان مقاله از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی به سبب در اختیار قرار دادن نگاشت‌های مورد نیاز تشکر می‌کنند. همچنین از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله به سبب حمایت‌های لازم و تهیه اطلاعات مورد نیاز تشکر می‌گردد. از داوران محترم که با پیشنهادات تخصصی سبب افزایش کیفیت علمی مقاله شده‌اند تشکر

## منابع

- Afsar Dizaj, E., et al. (2018). Probabilistic seismic vulnerability analysis of corroded reinforced concrete frames including spatial variability of pitting corrosion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114, 97–112.
- Akbari, A., et al. (2025). High-rise buildings sitting on clayey soils: How the top-down construction style affects their seismic behavior. *Structures*, 62, 105–115.
- Ambraseys, N. N., & Melville, C. P. (1982). *A history of Persian earthquakes*. Cambridge University Press.
- Baker, J. W., & Cornell, C. A. (2006). Spectral shape, epsilon and record selection. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(9), 1077–1095.
- Behnamfar, F., & Fathollahi, A. (2017). Soft soil seismic design spectra including soil–structure interaction. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 30(10), 1443–1450.  
[https://www.ije.ir/article\\_73025.html](https://www.ije.ir/article_73025.html)
- Civelekler, E., Afacan, K. B., & Okur, D. V. (2023). Effect of site-specific soil characteristics on the nonlinear ground response analysis and comparison of the results with equivalent linear analysis. *Journal of Applied Geophysics*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.105250>
- Du, K., Gao, J., Ji, K., & Bai, J. (2023). A modal conditional mean spectrum for nonlinear structural response time-history analysis of tall buildings to consider higher mode effects. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22, 1187–1216.
- El Janous, S., Abid, M. A., Afras, A., & Ghoulbzouri, A. E. (2024). Soil–structure interaction influence on the seismic performance of buildings. *Civil Engineering and Architecture*.  
<https://doi.org/10.13189/cea.2024.120210>
- Ghodrati Amiri, G., et al. (2010). A simplified method to determine seismic responses of reinforced concrete moment resisting building frames under influence of soil–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(11), 1259–1267.
- Jalili, J., Mahood, M., & Shafiee, A. (2022). Evaluation of near-fault effects on the general code spectrum of the Iranian code of practice

- for seismic-resistant design of buildings, case study: Tehran. *Journal of Seismology*, 26, 1223–1244. <https://doi.org/10.1007/s10950-022-10115-7>
- Layas, F. M., Karakale, V., & Suleiman, R. E. (2024). Developing design response spectra for Benghazi city including soil magnification effects. *Building Engineering*, 2(1), 1190. <https://doi.org/10.59400/be.v2i1.1190>
- Liu, W. F., Chen, X. Z., & Sui, J. Y. (2011). Statistical analyses of response spectra on medium-stiff soil site. *Applied Mechanics and Materials*, 1549–1554. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.90-93.1549>
- Loye, A. K., Evans, S. J., Lin, S.-L., & Dhakal, R. (2013). Effect of soil type on seismic demand. University of Canterbury Repository. <https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/8010>
- Mahood, M., Hamzehloo, H., & Doloei, G. J. (2009). Attenuation of high frequency P and S waves in the crust of East-Central Iran. *Geophysical Journal International*, 179(3), 1669–1678. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04363.x>
- McCallen, D., Pitarka, A., Tang, H., Nakata, R., Mosalam, K. M., Petrone, F., Günay, S., & Perez, C. (2025). An open-access simulated earthquake ground-motion database for an M7 Hayward Fault earthquake in the San Francisco Bay Region. *Earthquake Spectra*. <https://doi.org/10.1177/87552930251340960>
- Mohammadpour, M., & Zarrin, M. (2022). Investigating the effect of soil type in 2800 Iranian Code and UBC on the lateral displacement of steel flexural frame with low, medium and high period. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 11(1), 1–7.
- Molua, C. O., & Ataman, J. O. (2024). Dynamic analysis of soil–structure interaction in earthquake-prone areas. *International Journal of Applied and Structural Mechanics*, 12, 19–29. <https://doi.org/10.55529/ijasm.12.19.29>
- Nourzadeh, D., Ebad-Sichani, M., & Takada, S. (2013). Site-specific approach for seismic design spectra in Iran, based on recent major strong ground motions. *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 7(1), 69–74.
- Shakib, H., & Fuladgar, A. (2003). Effect of vertical component of earthquake on the response of pure-friction base-isolated asymmetric buildings. *Engineering Structures*, 25(13), 1841–1850.
- Ukey, A., & Bondre, R. A. (2020). Response spectrum of multistory building situated on different soil condition. *International Journal*, 7(2), 369–374.

## Site-specific response spectrum estimation for type III soil in Kish island

Shima Taheri<sup>1\*</sup> and Majid Mahood<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Earthquake Prediction Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

(Received: 04 September 2025, Accepted: 19 December 2025)

### Summary

Given the critical importance of structures such as power plants, dams, bridges, and industrial facilities, it is essential to evaluate their seismic vulnerability and the potential hazards arising from local site conditions, which can significantly amplify seismic risk. With the rapid development of vital infrastructure and construction of high-rise buildings on Kish Island, which is located within the active Zagros folded zone, accurate seismic hazard assessment has become increasingly important. This study investigated the seismicity within a 100 km radius of Kish Island and estimated a site-specific response spectrum, comparing it with the standard spectrum defined in Iranian Code 2800. According to this code, Kish Island is classified as a relatively high-risk seismic zone. The largest recorded earthquake in the region occurred on March 16, 2022, with a magnitude of 6.1 near Kookherd, approximately 70 km northeast of Kish Island, Iran. Ground motion records from two significant earthquakes near Bandar Charak, which were also recorded in Kish, were utilized to estimate the site-specific spectrum. These include the June 15, 2022 (M5.5), and June 25, 2022 (M5.7), events, which occurred at distances of 49 km and 31 km from Kish, respectively. Records from the Bam earthquake were also considered because of the similar site conditions. The results indicate that the site-specific response spectrum exceeds the standard values for periods up to 0.5 s and remains above the minimum of the standard spectrum across all periods. This spectrum, which accounts for regional tectonics and site effects, is recommended as a reliable tool for designing critical and high-rise structures. It was also applied in the analysis of a building currently under construction in Kish Island. In the context of site-specific response spectra for Kish Island, characterized by Type III soil (medium to soft soils with shear wave velocities typically ranging between 175 m/s and 375 m/s according to Iranian Code 2800), the impact of soil-structure interaction (SSI) on the seismic behavior of high-rise buildings is critical. Type III soil, commonly found in coastal regions such as Kish Island due to sandy and calcareous deposits overlying clay layers, tends to amplify ground motions, resulting in increased structural demands compared to stiffer soils. SSI in Type III soil environments alters the dynamic characteristics of tall buildings by lengthening their natural period and increasing the damping owing to soil flexibility and radiation damping effects. Future research should refine site-specific response spectra through probabilistic assessments of soil-structure interaction (SSI) to better align with the requirements of Iranian Code 2800.

**Keywords:** Soil type, site-specific response spectrum, site effect, seismic hazard, Kish island

---

\* Corresponding author:

taheri@pnu.ac.ir